

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04162

研究課題名(和文) 多周波ステップCPC方式における空間・周波数ダイバーシチ技術の研究

研究課題名(英文) Space-Frequency Diversity Techniques in Stepped Multiple Frequency CPC Radar

研究代表者

秋田 学 (Akita, Manabu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：50619393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らの研究グループが提案する多周波ステップ方式は遠距離性と高距離分解能が得られる独自の新しいレーダ変調方式である。多周波ステップ方式において中心周波数 80GHz として ± 10 GHz程度の離隔した櫛形状の周波数アサインがマルチパスフェージング問題に対し有効な周波数活用方法となることを示した。さらに離隔した周波数帯域の周波数コヒーレント合成法により、近距離から遠距離まで安定した目標の検知能力の向上が期待されることが計算機シミュレーション結果により示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代のレーダには市街地で運用可能(多目標対処能力)、遠距離性と高距離分解能の両立、近距離から遠距離まで安定した検知能力等が求められ、これらを電波法令の特定小電力無線局規格の枠の中において達成することが求められる。多周波ステップ方式において櫛形状の周波数アサインと周波数方向のコヒーレント合成法を融合することにより、上記すべての性能の実現可能性を有するレーダ変復調方式の一構成が示された。

研究成果の概要(英文)：Stepped multiple frequency radar modulation proposed by our research group is a unique new radar modulation method that provides long detectable range and high resolution. In the stepped multiple frequency method, it was shown that a comb-like frequency assign with a center frequency of 80 GHz and a frequency range of ± 10 GHz is one of an effective frequency utilization method to mitigate the multipath fading problem. Furthermore, simulation results indicated that the proposed signal processing coherently combining the separated frequency bands could help stable target detection from short to long range.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ変復調方式 空間・周波数ダイバーシチ 多周波ステップ方式 マルチパスフェージング

1. 研究開始当初の背景

レーダはレーザなどに比べ耐候性に優れるという特長があるため、ITS 産業分野において注目が高まっている。現在、同分野においては比較的低速の信号処理で高距離分解能が得られる FMCW 方式が広く採用されている。しかし FMCW 方式は目標が多く存在する環境下では、ペアリング誤作動を生じ、データの信頼性が低下するという原理上の課題がある。次世代のレーダには (1) 市街地等多目標環境で運用可能 (多目標対処能力), (2) 遠距離性, (3) 広い検知エリア, (4) 高距離分解能, (5) 目標位置速度推定, (6) 近距離から遠距離まで安定した検知能力が要求されこれらを電波法令の特定小電力無線局規格の枠の中において達成することが求められる。このような背景から研究代表者らは (1) ~ (4) を実現する多周波ステップ方式を提案している (科研費研究活動スタート支援, バイスタティック方式による次世代車載レーダの基盤技術研究, 2013)。さらに多周波ステップ方式のマルチスタティック化により近距離において⑤目標の位置速度ベクトルを得る方法を提案している (科研費若手研究 (B), マルチスタティック方式による次世代車載レーダの基盤技術研究, 2014-2015)。

一方で, 図 1 に示すようにレーダの送信アンテナから送信された信号が目標で反射して受信アンテナに直接到達する直接波と路面反射マルチパス波の位相差が送信波の半波長の奇数倍となるような距離では, 信号間で干渉して弱めあい受信電力が低下するいわゆるマルチパスフェージング現象が避けられない。図 1 より, 車載レーダ (アンテナ高 0.7m 程度, 目標高 1.0m 程度) では, とくに 50m 以遠 (遠距離) においてフェージングの発生する幅が広がっていることがわかる。このとき前方の人や車両等の検知が困難となり, 衝突回避や自動運転のセンサとしての信頼性が著しく低下する深刻な問題が発生しうる。

2. 研究の目的

本研究では, 上記問題に対する対策として, 多周波ステップ方式の各ステップ周波数のそれぞれのサブバンドの信号をコヒーレントに合成するだけでなくレーダで利用可能な複数の離隔した周波数帯域 (例えば 60GHz 帯と 79GHz 帯) のバンド間の信号をもコヒーレントに合成 (離隔周波数コヒーレント合成) するマルチパスフェージング対処技術を提案する。アンテナ設置に関する空間的な制限 (水平方向および垂直方向の許容される距離の広がり) については, 応用を想定した設置条件を踏まえて検討する。研究代表者らの研究グループが提案する独自のレーダ変調方式である多周波ステップ方式による (1) 多目標対処能力, (2) 遠距離性, (3) 広い検知エリア, (4) 高距離分解能, (5) 目標の位置速度ベクトルが得られるという特長に加え, 離隔した周波数帯域の周波数コヒーレント合成法により (6) 近距離から遠距離まで安定した目標の検知能力の実現可能性を有するレーダ変復調方式および信号処理を提案することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

3.1 路面反射マルチパスフェージング特性の把握

本研究では, まず全帯域幅 B と分割数 N_b をパラメータとしてマルチパス環境下における受信信号強度についてのパラメータスタディを行う。中心周波数 f_c , 占有帯域幅 B_o , 周波数ステップ幅 Δf 及びパルス帯域幅 b を一定のもと, 離隔した周波数の全体の帯域幅 B (5-30GHz) 及び周波数帯域の分割数 N_b (2, 4, 8) を変化させることによるマルチパス環境下における受信信号レベルについて考察する。

3.2 路面反射マルチパスフェージング対処技術の開発

3.1 の路面反射マルチパスフェージング特性を踏まえ, この路面反射マルチパスフェージングに対処する空間・周波数コヒーレント合成のアルゴリズムを開発する。ここでは ITS 産業分野 (とくに車載レーダ) への応用を想定して (観測時間の制約, アンテナ設置高度の制約, 目標の想定される速度域, 目標の想定される高さの範囲等) 対策案を検討する。

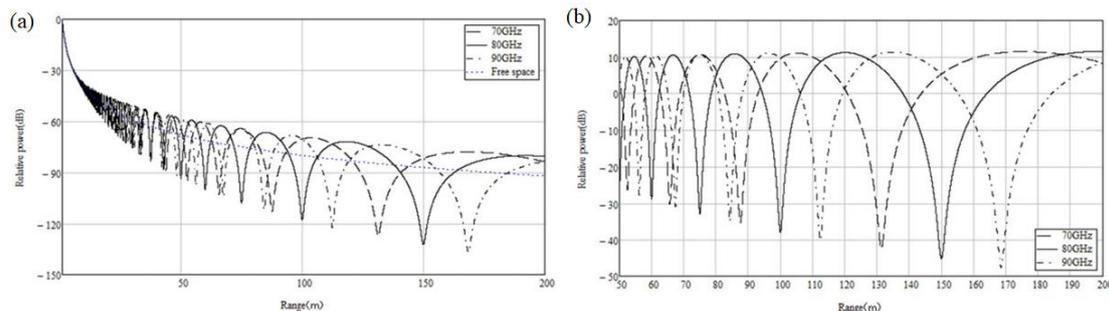


図 1 路面反射マルチパス環境における受信信号レベル ((a)距離による電力減衰あり, (b)距離による電力減衰なし)

3. 3 路面反射マルチパスフェージング対処アルゴリズムの評価

3.2で検討した提案法のアルゴリズムの有効性について、車載レーダの環境を想定し、近距離から遠距離までの安定した検知能力の観点から計算機シミュレーションにより評価する。

4. 研究成果

4. 1 多周波ステップレーダにおける周波数分割配置

レーダの応用の一つである車載レーダでは路面反射マルチパスフェージングへの対処が求められる。変復調方式に関わらず目標反射信号も路面反射信号も同じ信号（レーダ分解能に対し距離、角度、速度が同じで位相のみ異なる）として計測されるため、その位相関係によってはフェージングが発生する。同問題への対処法としてこれまでに、航空機の検知を目的とした過去の研究において複数アンテナを用いた空間ダイバーシティ及び周波数が離れた複数バンドへ最大比合成法を適用する周波数ダイバーシティが有効であることが報告されている。本研究では、空間ダイバーシティは車載レーダのアンテナ設置高度の制約を受ける一方で、上記多周波ステップ方式が周波数を切り替える方式であり周波数ダイバーシティの方にとくに適合性が良いことを活用し、楕形状の周波数アサイン（中心周波数 $f_c=80\text{GHz}$ に対し、周波数帯域幅 $B=20\text{GHz}$ 、帯域分割数 $N_b=4$ 程度）が可能であれば、それらの周波数間が非コヒーレント（一般的には離れた周波数帯間で位相は不連続となり非コヒーレント）であっても同問題に対し有効な周波数活用法となることが明らかとなった。

4. 2 路面反射マルチパスフェージング対処アルゴリズム

前節で検討した離れた周波数を用いる場合、周波数方向信号処理の入力において異なる帯域間（ f_{iF} 間（たとえば60GHz帯と79GHz帯など））では f_{iF} 間の周波数差が帯域内の周波数ステップ幅 Δf に比べ非常に大きいので一般的に位相が不連続となる。このため、図2(a)に示すように各帯域で合成帯域後、ノンコヒーレント積分する構成（以降、SWW+NC）が信号処理の基本となる。また、周波数を選択的に利用しS/Nを最大化させる処理（すなわち最大比合成）とする構成（信号処理(b)が考えられる（以降、MRC）。車載レーダの環境においては、レーダや目標の移動による観測時間内のフェージング環境の変化への対応として観測信号全体から信号固有空間を求める信号処理構成(b)に加え、IIR形式にて同空間を求める固有空間追尾法を用いた最大比合成の処理構成信号処理(c)（以降、EVTRK）を提案する。

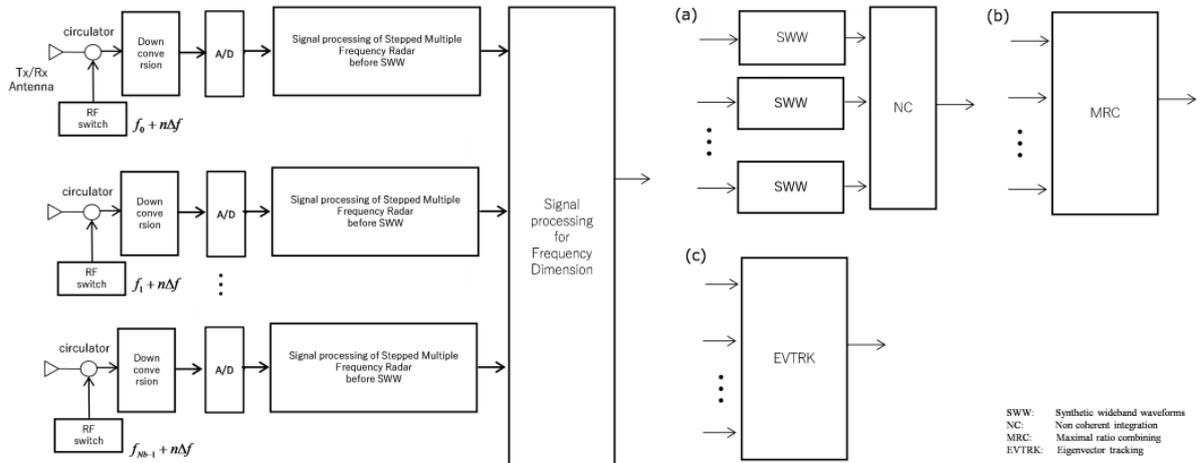


図 2 多周波ステップレーダの信号処理構成

表 1 計算機シミュレーションにおけるレーダパラメータ

Parameters	Specifications
Center Frequency f_c	80GHz
Transmission Bandwidth B	20GHz
Occupied bandwidth B_o	1.6GHz
Number of divided Bands N_b	4
Frequency step width Δf	50MHz
Number of frequency steps N	32
Number of frequency steps for each band	8
Sub-pulse bandwidth	80MHz
Antenna altitude H_a	0.7m

表 2 同目標パラメータ

Parameters	Specifications
Relative velocity V_t	1km/h - 128km/h
Target Altitude H_t	0.8m
Range between targets	0.3m
S/N for a single target in free-space	5dB@200m

4. 3 計算機シミュレーション

本研究では、表 1 で示すマルチパスフェージング対処に有効と思われるレーダパラメータを用い、図 1 において単帯域でのフェージングが顕著である距離（距離 143m）における各信号処理による出力 S/N の相対速度依存性、距離ゲート内の目標数依存性、信号処理時間内振幅・振動周期依存性について計算機シミュレーションにより評価した。その結果、目標相対速度が低速の領域においては、MRC 及び EVTRK が高い S/N を示す一方で、MRC は相対速度の増加に伴い出力 S/N の低下が確認された。一方で EVTRK は本シミュレーション条件において、相対速度 1km/h から 128km/h までほぼ一定の出力 S/N を示すことが明らかとなった。距離ゲート内の目標数依存性については、SWW+NC は距離ゲート内の目標数によらずほぼ一定の出力 S/N を示すのに対し、EVTRK は目標数の増加に伴い出力 S/N 改善が確認された。ここで距離ゲート内に目標数が複数の場合とはボリュームを有するターゲット（車両等）の距離ゲート以内に含まれる各構成部からの反射を想定している。また、車載レーダで前方の車両等を目標とすると、路面の凹凸等によりスナップショット間で高度にばらつきが発生すると思われる。振幅依存性について、MRC は周波数依存性が確認されたがその特性が数 dB の電力差として現れるのは観測時間内の振幅が 8cm 以上かつその周期が信号処理時間幅の 4 倍以下の場合であることがわかった。一方 EVTRK を用いた場合は、振幅依存性も振幅依存性も見られず、MRC と比較して解析した条件の範囲内においては目標高度変化に対するロバスト性が確認された。

図 3 に、表 1 に示すレーダパラメータ、表 2 に示す目標パラメータ（ここでは単一目標で相対速度 32km/h）に対する距離 50–200m の EVTRK による出力結果を示す。中心周波数 80GHz に対し、全周波数帯域幅 20GHz、分割数 4 とした入力信号を用い、周波数方向の信号処理として EVTRK を採用することにより 50–200m の距離において電力のヌル点が大幅に改善され、マルチパスによるフェージングの影響の緩和が期待される結果が得られた。最大比合成は振幅の高い周波数を選択的に利用するウェイトを推定し S/N を最大化させる処理であり、受信信号の振幅の特に大きい周波数があるとき有効な処理である。周波数間でその最大振幅が比較的小さい距離（152m 付近）において同図青実線で示す自由空間で得られる受信信号を用いた合成帯域処理（SWW）出力より S/N 期待値がわずかに（0.4dB 程度）小さい距離が確認されるものの、検知対象のほぼ全距離範囲にわたり自由空間と同等以上の出力 S/N が期待される結果であることが定性的に確認された。

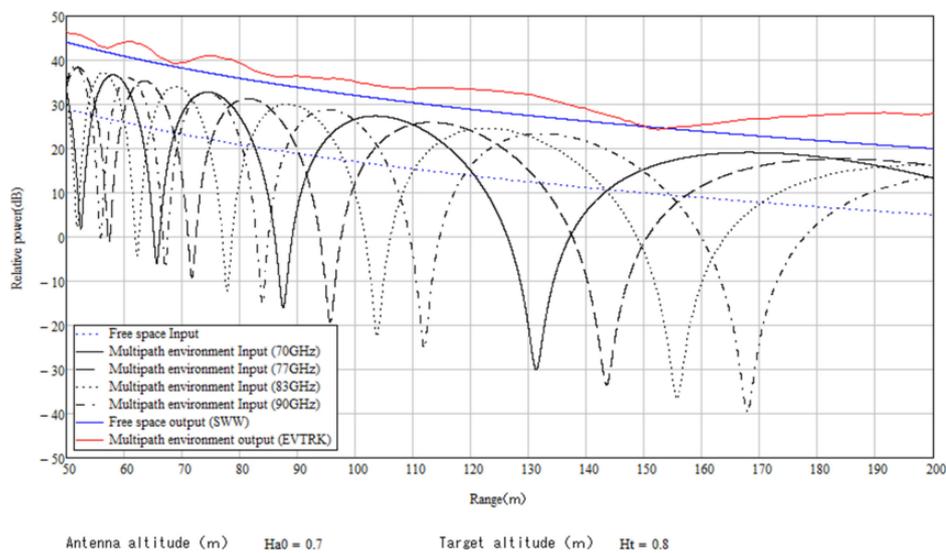


図 3 EVTRK 信号処理構成による出力結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 稲葉敬之, 秋田学, 谷口匠	4. 巻 Vol. J105-B
2. 論文標題 路面反射マルチパス環境における多周波ステップレダの楕形周波数分割配置と信号処理構成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 B	6. 最初と最後の頁 423-432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2021JBP3022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲葉敬之, 秋田学	4. 巻 142
2. 論文標題 背景クラッタ中のcm級小物体検知における多周波ステップレダのパラメータスタディと評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 58-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	稲葉 敬之 (Inaba Takayuki) (40508826)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------